



2022년도 연구조사사업 최종보고서

초미세먼지 오염원 추적을 위한 주요지역 성분조사

인천의  대한민국의 
균형 · 창조 · 소통

2023. 1.

 인천광역시 보건환경연구원

<https://www.incheon.go.kr/ecopia>

[대기평가과]

초미세먼지 오염원 추적을 위한 주요지역 성분조사

이지은*¹⁾, 서성녀, 이명진, 최종규²⁾, 여인환, 이선우, 박진영, 곽완순, 권문주
인천광역시보건환경연구원 ¹⁾대기평가과, ²⁾환경조사과

Source apportionment of PM-2.5 in main area, Incheon using PMF

Ji-Eun Lee*, Seong-Yeo Seo, Myoung-Jin Lee, Jong-Kyu Choi, In-Hwan Yeo, Seon-Woo Lee,
Jin-Young Park, Wan-Soon Kwack, Mun-Ju Kwon

Division of Air Quality Assessment, Incheon Research Institute of Public Health and Environment
Division of Environmental Research, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

ABSTRACT

Incheon, Korea experience severe air pollution owing to geographical location near China which is the most polluted East Asian country with high mass concentrations of PM-2.5. Although the occurrence of air pollution among neighboring countries and transferring PM-2.5 of inland, studies involving simultaneous ground-base PM-2.5 monitoring and source apportionment in countryside and downtown area have not been conducted to date. This study performed simultaneous daily ground-based monitoring of PM-2.5 in Jangbong, Youngjong, and Guwol from January to October 2022. The mass concentrations of PM-2.5 and its major chemical components were analyzed simultaneously during 2022. Positive matrix factorization (PMF) was utilized for the source apportionment of ambient PM-2.5 at the three sites. Nine sources were identified at each site. While secondary nitrate, secondary sulfate, vehicle, oil combustion, biomass burning, sea and salt were commonly found at each site, coal combustion were identified only at Jangbong. Sources of contribution at Youngjong were larger than that of other sites were sea salt and vehicle. In Guwol area, Industry and vehicle were investigated as the major sources. In conclusion, this study shows that the source apportionment model yields results for identifying pollutant sources in three receptor locations.

Key words : PM-2.5, Source apportionment, Positive matrix factorization(PMF), Incheon

I. 서론

매우 작은 입자를 의미하는 초미세먼지는 1990년대 이후 기침, 악성 천식, 만성 기관지염, 폐 기능 손상 등 호흡기 질환 뿐만 아니라 심장 관련 질환환자의 조기사망을 유발하여 이로 인한 인체 위해성이 높다는 사실이 밝혀졌다(Russell and Brunekreef, 2009; Pope and Dockery, 2006). 이에 따라 세계보건기구(WHO)의 국제암연구소가 미세먼지를 1군 발암물질로 분류하고(WHO, 2013), 우리나라의 경우도 미세먼지 예보제 시행(2014), 미세먼지 관리 특별대책(2016), 미세먼지 관리 종합대책 마련(2017), 대기환경기준 강화(2018), 미세먼지 특별법 및 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행(2019) 등 대기오염 저감을 위한 정책의 개선이 지속적으로 이루어져 왔다. 하지만 대기오염의 형태가 선진국형으로 전환되고 있고 국민들의 체감오염도도 꾸준히 증가하고 있어 대기 중 초미세먼지의 관리는 여전히 중요한 과제로 남아있다.

초미세먼지(PM-2.5)는 공기역학적 직경이 2.5 μm 이하의 입자상 물질(particulate matter; PM)을 의미하며, 입자상오염물질은 1차 입자(primary aerosol)와 2차 입자(secondary aerosol)로 구분된다. 오염원에서 직접 배출되는 1차 입자와 달리 2차 입자는 가스상 오염물질이 대기 중 화학반응에 의해 입자화된 것으로, 2차 입자의 경우 경유자동차의 엔진 연소에서 발생하는 검댕, 대기 중 기체상 황산화물(SO_x)이 반응하여 생성되는 황산염 입자(secondary sulfate aerosol) 등 PM-2.5가 대부분을 차지한다(Seinfeld and Pandis, 2016). PM-2.5는 화석연료의 연소과정, 자동차의 배출가스 및 화학물질의 제조과정 등과 같은 인위적 오염원(source)에서 주로 배출되거나 전구물질에 의한 2차 생성에 의해 주로 발생하는 것이 PM-10과 다른 점이다.

이렇듯 초미세먼지는 국가와 지방의 핵심적인 대기환경 정책관리의 목표로, 국가 및 지자체에서 대기오염측정망 운영 등을 통해 대기오염물질의 특성을 조사하고 있다. 환경부 국립환경과학원에서는 국가 배경지역 및 권역별(백령도, 수도권, 중부권, 경기권, 충청권, 영남권, 호남권, 제주도 측정소 등) 대기질 현황, PM-2.5 오염원 기여도 평가, 중국으로부터 유입되는 대기오염물질의 영향, 고농도 오염현상에 대한 원인 규명 등을 위해 2007년부터 우리나라의 주요 권역에 대기오염집중측정망을 설치 운영하고 있다(NIER, 2019, 2016). 특히 백령도와 제주도 측정망은 대기오염물질의 장거리 이동 감시 및 국가배경 농도와 관련된 역할을 수행한다.

인천시의 경우 도심 내 대기질을 측정하기 위하여 30여 개의 대기환경측정소를 운영하고 있지만, 관내 도서지역의 경우 측정소 설치에 한계가 있어 도심지역에 비해 대기환경정보가 부족한 실정이다. 하지만 장봉도 등 도서지역은 오염배출원이 적고, 외부유입 전단에 위치하여 인천시의 배경농도를 파악하기 위한 연구 가치가 높은 지점이다. 특히 인천은 해안에 위치하고 있어 해륙풍, 국지풍과 기상요인 등 대기환경에 영향을 미치는 다양한 요소들에 대한 세밀한 분석과 평가가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 외부유입 전단에 위치한 장봉도와 유입 중간지점인 영종도, 그리고 도심지역인 구월동 측정소에서 채취된 24시간 초미세먼지(PM-2.5) 성분분석 자료를 이용하여 인천시 주요지

역의 초미세먼지 오염원을 분류하고 외부유입 영향을 추적하고자 하였다. 이를 통해 지역차원에서 합리적이고 달성 가능한 초미세먼지 저감 목표 설정을 위한 정보를 제공하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

2.1. 연구대상 및 분석방법

본 연구 대상지역은 (Fig. 1.)과 같이 장봉, 영종, 구월 대기측정소 3개 지점을 선정하였다. 시료채취는 매월 2~3일 간격으로 1회 채취하였으며, 2022년 1월부터 10월까지 장봉지점 126개, 영종지점 122개, 구월지점 117개를 분석하여 총 365개의 시료를 분석하였다.

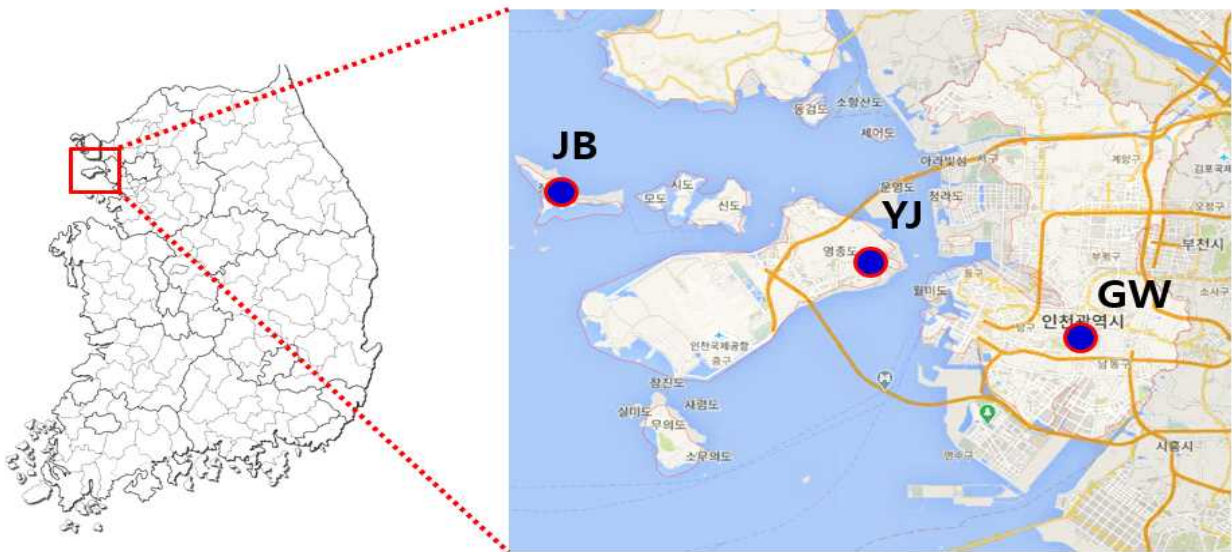


Fig. 1. Location of sampling site.

성분 분석을 위한 시료채취는 석영 여과지(Quartz filter)와 PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene) 재질의 테플론 여과지를 사용하였다. 채취장비는 FDS-210(DOOLITECH, Korea)를 이용하여, 유량 16.7 L/min, 입경분리 임팩터 WINS(Well Impactor Ninety-Six)를 장착하여 24시간 PM-2.5 시료를 채취하였다. 분석항목은 석영 여과지로 유기탄소(Organic Carbon, OC), 원소탄소(Elemental Carbon, EC)를 분석하였고, 테플론 여과지는 중량농도(PM-2.5), 금속성분(Li, Be, Mg, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sb, Tl, Pb)과 이온성분(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})을 분석하여 총 32항목을 분석하였다.

PM-2.5 질량농도는 채취 전·후 24시간 동안 항량하여 3번 분석한 값의 평균값을 사용하였으며, 대기환경측정망 설치·운영지침(2022)에 따라 탄소성분, 금속성분, 이온성분을 분석하였다. 탄소성분 분석에는 Semi-Continuous OCEC analyzer(Sunset Lab., USA) 장비를 사용하였으며, NIOSH(National Institute of Occupational Safety and Health) 5040 method에 준하는 TOT방식으로 단계별로 온도에 따라 석영필터에 포집된 PM-2.5를 태워 발생된 가스를 이산화탄소로 산

화시키고 다시 메탄으로 환원시켜 FID로 분석한다. OC는 He가스(순도 99.999 % 이상) 존재 하에서 온도(315 ~ 870 ℃) 승온에 따라 열분해되고, EC는 He/O₂ 가스(He 10% 혼합, 순도 99.999 % 이상) 존재 환경에서 단계별 온도(550 ~ 910 ℃)에서 연소시켜 측정한다. 앞의 두 단계의 과정이 끝난 후, 내부표준물질인 He/Methane 가스(Methane 5 % 혼합, Research grade)를 사용하여 교정된다. 이온 분석의 경우, PTFE filter의 채취면이 비커 바닥면을 향하게 한 후 에탄올 200 μ l를 가하여 침적시키고, 초순수 20 mL를 첨가해 120 rpm으로 120분 동안 교반하여 추출한다. 추출액은 주사기 필터(0.45 μ m)를 사용해 여액을 IC(Dionex, ICS-5000)로 분석하였다. 중금속의 경우, 대기오염공정시험기준 ES 01209(환경대기 중 중금속화합물 동시분석-유도결합플라즈마분광법) 실험법에 따라 전처리와 중금속 분석을 실시하였다. 전처리는 마이크로웨이브 장비를 이용한 마이크로파 산분해법을 적용하였고, 중금속 분석은 ICP-MS(Inductively Coupled Mass Spectrometry, US/NexION 2000, Perkin elmer) 장비를 사용하였다.

2.2. 원인분석방법(PMF 모델)

PMF(Positive Matrix Factorization) 모델은 측정물질의 수용점에서 농도를 이용하여 발생원을 추정하는 수용모델의 하나로, 대기질에 영향을 미치는 오염원의 정성분석 뿐만 아니라 오염원별 기여도(Contribution)를 통해 정량적 추정이 가능하다. PMF 모델을 이용하여 다양한 오염원을 그룹화하고 변수 속에 있는 대기오염물질에 대해 오염원의 인자들을 찾아내는 것으로, 오염원 분류표의 부재 시에도 각 오염원의 기여도를 파악할 수 있어 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있으며 우리나라 실정에도 잘 맞는 모델이다. PMF 모델을 행렬식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$X = GF + E \quad (1)$$

행렬 X는 n개의 시료 중 측정된 m개의 분석 화학종으로 나타나는 차원이 n×m인 자료 행렬이다. 즉, X 행렬의 행(Row)은 하나의 시료에 대한 분석 화학종의 농도를 의미하며 열(Column)은 각각의 시료들(Samples)을 의미한다. G는 n×p 행렬이며, F는 p×m 행렬이다. 여기서 p는 추출된 인자의 수(오염원의 수)를 의미한다. F 행렬의 행은 특정 오염원에 대한 오염원 분류표(Source profile)를 나타내며 이에 대응하는 G 행렬은 특정오염원에 대한 배출량, 즉 각 측정 기간에 대한 오염원의 강도(Strength)를 의미한다. 그리고 행렬 E는 잔차 행렬(Residual matrix)을 의미하며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$E_{ij} = X_{ij} - \sum_{h=1}^p G_{ih} F_{hj} \quad (2)$$

$$(i = 1 \sim n, j = 1 \sim m, k = 1 \sim p)$$

PMF 모델은 G(기여도)값과 F(오염원분류표)값이 양의 값을 갖도록 설계되어 있으며, G값과 F값에 대한 Q(E)를 최소화시키는 조건에서 모델의 해를 구하고 있다. μ_{ij} 는 X_{ij} 의 불확도를 나타낸다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{\mu_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

III. 결과 및 고찰

3.1. PM-2.5 및 구성성분 농도 분포

Table 1은 본 연구에서 분석한 PM-2.5 및 구성성분의 질량 농도와 분율을 나타낸 결과이다. PM-2.5의 평균 농도는 장봉 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 영종 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 구월 $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 배경지역에서 도심지역으로 갈수록 높아졌으며, 전체적으로 겨울철에서 여름철로 갈수록 초미세먼지의 농도가 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 2).

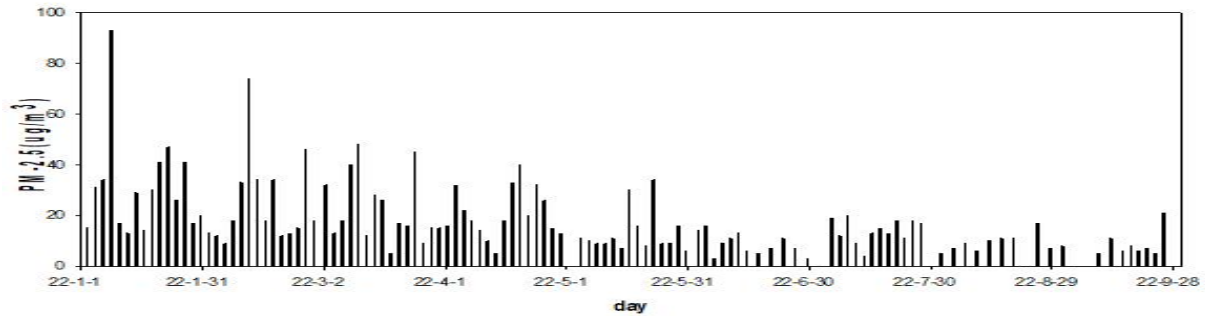


Fig. 2. Daily PM-2.5 concentration of sampling period.

PM-2.5를 구성하고 있는 화학성분들의 조성 비율을 Fig. 3에 나타냈다. 장봉지역은 이온성분(59.9%) > 탄소성분(27.3%) > 기타성분(11.2%) > 금속성분(1.6%), 영종지역은 이온성분(54.9%) > 탄소성분(28.2%) > 기타성분(15.4%) > 금속성분(1.4%), 구월지역은 이온성분(55.7%) > 탄소성분(27.9%) > 기타성분(15.0%) > 금속성분(1.5%)으로 나타났다. 세 지역 모두 이온성분이 가장 많은 비율을 차지하였으며, 장봉지역의 경우 이온성분 중 황산이온이 22.4%로 가장 높았고 질산이온 20.2%, 암모늄이온 14.2%, 마그네슘이온 1.0%로 분석되었다. 영종지역과 구월 지역은 이온성분 중 질산이온이 각각 19.7%, 22.1%로 가장 높았고 황산이온 각각 19.6%, 18.3%, 두 지역 모두 암모늄 12.8%, 염소이온 0.9% 순으로 분석되었다.

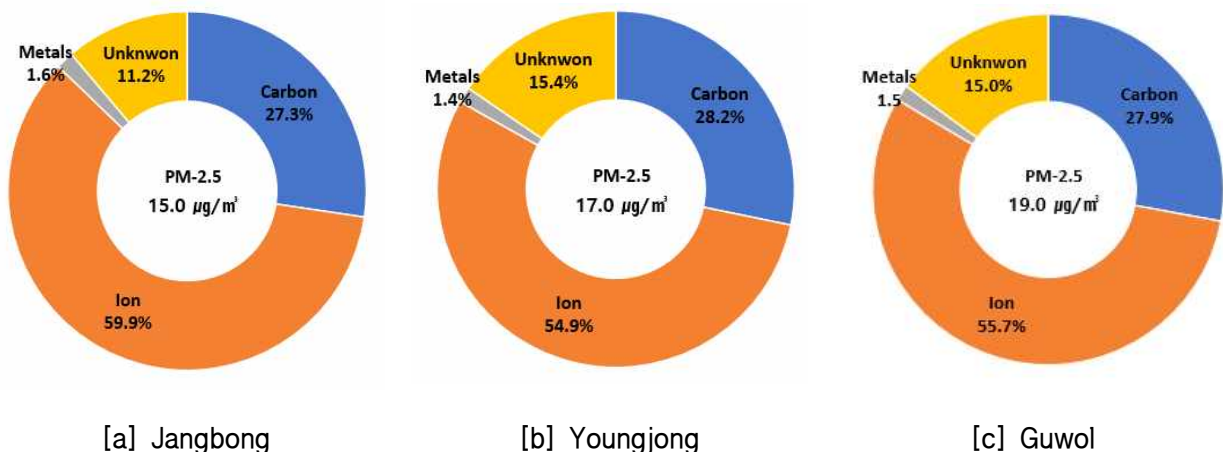


Fig. 3. Percent contributions of chemical components in PM-2.5.

Table 1. The concentrations and mass fraction of PM-2.5 and 32 species

Species	Jangbong		Youngjong		Guwol		Mean	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
PM-2.5	15	-	17	-	19	-	17	-
OC	3.8	25.3	4.4	25.9	4.8	25.3	4.3	25.3
EC	0.3	2.0	0.4	2.4	0.5	2.6	0.4	2.4
Na ⁺	0.1097	0.7	0.1060	0.6	0.1006	0.5	0.1054	0.6
NH ₄ ⁺	2.1240	14.2	2.1675	12.8	2.4248	12.8	2.2388	13.2
K ⁺	0.0378	0.3	0.0300	0.2	0.0274	0.1	0.0317	0.2
Ca ²⁺	0.1479	1.0	0.1358	0.8	0.1310	0.7	0.1382	0.8
Mg ²⁺	0.0665	0.4	0.0644	0.4	0.0609	0.3	0.0639	0.4
NO ₃ ⁻	3.0251	20.2	3.3537	19.7	4.1932	22.1	3.5240	20.7
SO ₄ ²⁻	3.3611	22.4	3.3293	19.6	3.4691	18.3	3.3865	19.9
Cl ⁻	0.1100	0.7	0.1524	0.9	0.1709	0.9	0.1444	0.8
Li	0.0003	0.0	0.0016	0.0	0.0005	0.0	0.0008	0.0
Be	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0
Mg	0.0269	0.2	0.0253	0.1	0.0268	0.1	0.0263	0.2
Ca	0.0153	0.1	0.0230	0.1	0.0189	0.1	0.0191	0.1
Ti	0.0026	0.0	0.0043	0.0	0.0043	0.0	0.0037	0.0
V	0.0017	0.0	0.0012	0.0	0.0012	0.0	0.0014	0.0
Cr	0.0146	0.1	0.0122	0.1	0.0142	0.1	0.0137	0.1
Mn	0.0057	0.0	0.0124	0.1	0.0114	0.1	0.0098	0.1
Fe	0.0867	0.6	0.0981	0.6	0.1318	0.7	0.1055	0.6
Co	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0001	0.0	0.0001	0.0
Ni	0.0026	0.0	0.0021	0.0	0.0021	0.0	0.0023	0.0
Cu	0.0035	0.0	0.0048	0.0	0.0085	0.0	0.0056	0.0
Zn	0.0243	0.2	0.0326	0.2	0.0388	0.2	0.0319	0.2
As	0.0051	0.0	0.0072	0.0	0.0060	0.0	0.0061	0.0
Se	0.0017	0.0	0.0010	0.0	0.0010	0.0	0.0012	0.0
Sr	0.0038	0.0	0.0005	0.0	0.0005	0.0	0.0016	0.0
Mo	0.0003	0.0	0.0005	0.0	0.0006	0.0	0.0005	0.0
Cd	0.0003	0.0	0.0003	0.0	0.0003	0.0	0.0003	0.0
Sb	0.0007	0.0	0.0015	0.0	0.0015	0.0	0.0012	0.0
Tl	0.0015	0.0	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.0005	0.0
Pb	0.0118	0.1	0.0102	0.1	0.0107	0.1	0.0109	0.1

Table 2에 초미세먼지 질량 농도에 따른 구성성분의 평균 비율을 지점별로 나타내었으며, 초미세먼지 농도에 따라 각 성분이 차지하는 비율이 달라진다. 초미세먼지의 농도가 높아지면 이온의 비율이 높아지는 반면 탄소의 비중은 낮아지고, 농도가 낮아지면 이온의 비율이 감소하고 탄소의 비율이 높아진다. 이는 대기 정체 등에 의하여 초미세먼지 농도가 증가할 때 대기 중의 NO_x,

NH₃ 가스상 전구체들이 입자상으로 변환하여 생성되는 2차 생성 입자들이 급격히 증가하는 반면, 탄소의 경우 직접 배출에 의한 1차 입자와 2차입자로 이루어져 있어 상대적으로 천천히 증가하기 때문이다(서울시, 2019). 중금속 역시 1차 오염 발생물이므로 탄소류와 비슷하게 PM-2.5가 증가함에 따라 전체 비율은 낮아짐을 알 수 있다. 인천시 배경지역(장봉)에서 도심지역(구월)으로 갈수록 PM-2.5 질량농도 구간에 따른 이온 및 탄소의 비율의 차이가 커지는 것을 알 수 있다(Table 2).

Table 2. Comparison of the chemical components percentage by case(~ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15 ~ 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 35 ~ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 75 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) of PM-2.5 concentrations

Sampling sites	PM-2.5	Ion	Carbon	Metal
Jangbong	~ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	54.0	33.1	1.8
	15 ~ 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	58.9	25.3	1.2
	35 ~ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68.3	21.3	1.0
	75 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	68.7	22.7	0.8
Youngjong	~ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	48.5	33.6	1.9
	15 ~ 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	55.0	28.7	1.2
	35 ~ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	67.1	20.5	1.0
	75 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	59.1	18.2	0.7
Guwol	~ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	44.3	36.7	2.0
	15 ~ 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	53.1	28.3	1.4
	35 ~ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	62.3	18.0	1.1
	75 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	76.3	18.2	0.8

PM-2.5 주요 구성성분은 Fig. 4에 나타났다. 장봉지역 OC 25.3% ($3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > SO₄²⁻ 22.4% ($3.3611 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO₃⁻ 20.2% ($3.0251 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NH₄⁺ 14.2% ($2.1240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > EC 2.0% ($0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 분석되었고, 영종지역은 OC 25.9% ($4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO₃⁻ 19.7% ($3.3537 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > SO₄²⁻ 19.6% ($3.3293 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NH₄⁺ 12.8% ($2.1675 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > EC 2.4% ($0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 구월지역은 OC 25.3% ($4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO₃⁻ 22.1% ($4.1932 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > SO₄²⁻ 18.3% ($3.4691 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NH₄⁺ 12.8% ($2.4248 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > EC 2.6% ($0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 분석되었다.

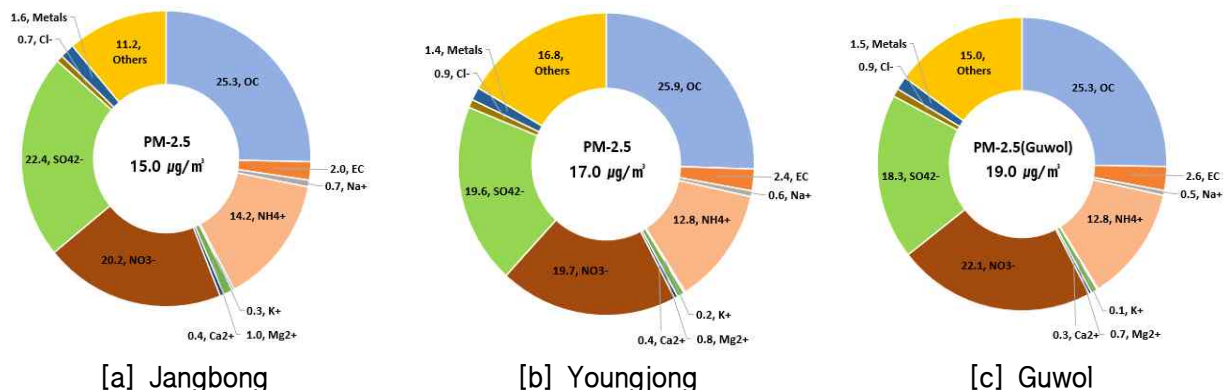


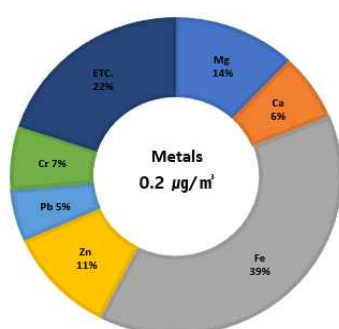
Fig. 4. Percent contributions of main chemical components in PM-2.5.

탄소 성분은 Fig. 4.에서 장봉지역 27.3%, 영종지역 25.9%, 구월지역 25.3%을 차지하였고, 세 지역의 초미세먼지 중 유기탄소의 성분이 가장 높았다. 탄소입자는 원소탄소(EC)와 유기탄소(OC)로 이루어져 있으며, 원소탄소는 발생원에서 직접 배출되는 1차 오염물질이며, 유기탄소는 연소과정에서 직접 배출되는 1차 유기탄소(primary organic carbon, POC)와 1차유기탄소가 변환되어 생성되는 2차 유기탄소(secondary organic carbon, SOC)가 있다. 2차 유기탄소는 휘발성 유기화합물 등이 대기 중 화학적 반응을 거쳐 기체가 입자로 전환되어 생성되기도 한다. 이때 2차 생성 유기탄소는 유기탄소와 원소탄소의 비(OC/EC)가 2.5 이상일 때 2차 생성 기여가 큰 것으로 알려져 있다. 시료채취 지점의 OC/EC는 평균 10.8로 조사되었다.

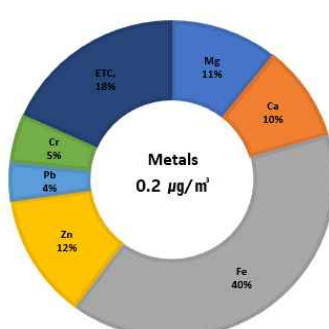
초미세먼지 중 금속성분이 차지하는 비율은 장봉과 영종이 1.3%, 구월이 1.4%로 낮은 수준으로 조사되었다. 본 연구에서는 금속성분 중 많은 비율을 차지하는 알루미늄(Al)과 규소(Si)는 포함되지 않아 이에 대한 고려가 필요하다. 금속성분은 세 지역에서 비슷하게 나타났으며 토양기원의 철(Fe), 마그네슘(Ca), 칼슘(Ca) 등의 농도가 높았다(Fig. 5.). 토양기원 외 금속성분으로는 아연(Zn), 크롬(Cr), 납(Pb) 순으로 높게 나타났으며, 지점별로는 장봉지역에서 구월, 영종지역에 비해 바나듐(V)과 스트론튬(Sr)의 농도가 높게 나타났(Table 3).

Table 3. The relative ratio of metal species

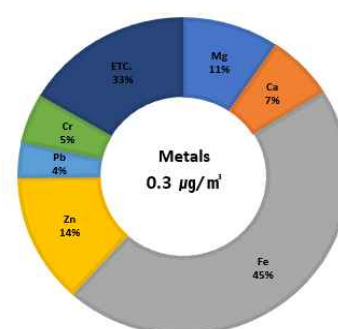
Ratio	Mg	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Cd
Jangbong	1.0	0.8	0.6	1.5	1.0	0.7	0.7	1.0	0.9	0.4	0.7	1.2	7.2	1.0
Youngjong	1.0	1.3	1.0	1.0	0.8	1.1	0.7	1.0	1.0	0.5	0.8	1.4	0.8	1.0
Guwol	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0



[a] Jangbong



[b] Youngjong



[c] Guwol

Fig 5. Percent contributions of metal components in PM-2.5.

3.2. PMF 모델 결과 및 오염원 기여도 비교

세 지점에서 채취한 132개 시료 중 최종 장봉 126개, 영종 122개, 구월 117개의 유효자료를 활용하여 PMF(EPA 5.0) 모델 분석을 하였다. 분석 결과 구월과 영종지역은 9개의 오염원, 장봉지역은 7개의 오염원을 확인하였고 Fig. 6과 같다.

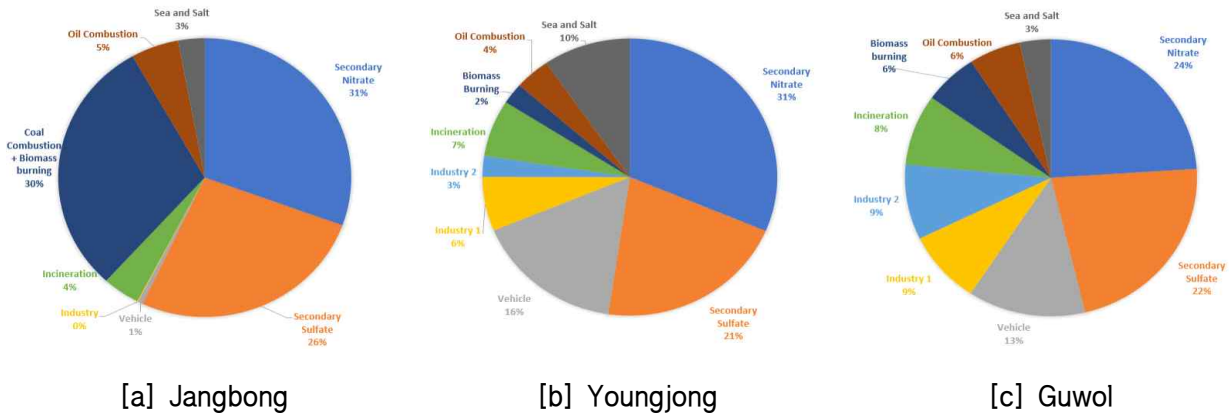


Fig. 6. Average source contributions during the sampling period at sample site.

Fig. 7. ~ Fig. 12.에 장봉과 구월지역의 오염원 분류표와 채취기간 동안의 각 오염원의 기여도 경향을 나타내었다. 초미세먼지 주요 발생원은 장봉지역은 이차 질산염(30.6%), 석탄 등 연소(30.1%), 이차 황산염(26.4%), 오일연소(5.3%), 소각(4.1%), 해염입자(2.9%)로 분석되었으며, 영종지역은 이차 질산염(31.4%), 이차 황산염(21.0%), 차량 등 이동배출원(16.4%), 해염입자(9.6%), 산업활동(Industry 1, 6.3%), 소각(6.6%), 오일연소(3.9%), 산업활동(Industry 2, 2.4%), 바이오매스 연소(2.4%)로 나타났다. 구월지역의 경우 이차 질산염(24.0%), 이차 황산염(22.3%), 차량(13.1%), 산업활동(Industry 2, 8.8%), 산업활동(Industry 1, 8.5%), 소각(8.2%), 바이오매스 연소(6.0%), 오일연소(5.7%), 해염입자(3.5%)로 분석되었다. 세 지역 모두 이차 질산염에 의한 미세먼지 기여도가 가장 크게 나타났고, 장봉지역의 경우 다른 지점에 비해 석탄, 오일 등 연소활동의 기여도가 상대적으로 높았다. 영종지역은 차량 등 이동배출원과 해염입자의 영향이 컸으며, 구월지역은 차량과 산업관련 발생원 비율이 상대적으로 높은 것으로 조사되었다.

좀더 자세히 각 오염원에 대해 살펴보면, 첫 번째 오염원은 OC, Cl, K 등이 기여하는 소각 및 생체소각(Biomass burning) 오염원으로 분류하였다. Cl의 경우 농업관련 식물성 소각과정과 폐기물의 연소과정에서 다량의 OC와 K이 배출되는 것으로 보고되었다(Nava et al., 2020; Harrison et al., 2012; Hwang and Hopke, 2006). 채취 기간 동안 상대적으로 겨울, 봄철 기여도가 높은 것으로 나타났으며, 장봉지역의 경우 주변의 농경지와 논, 밭두렁 소각, 농업폐기물 소각에 따른 영향을 받을 것이라 추정된다. 또한 다른 지역과 다르게 겨울철 가정용 난방 등 석탄 연소의 기여율 또한 높게 나타날 것이라 예상되어 동일한 연소 오염원으로 보았다.

두 번째 오염원은 SO_4^{2-} , NH_4^+ 등이 기여하는 2차 황산염(Secondary Sulfate) 오염원으로 분류하였다. 2차 황산염은 대기 중으로 배출된 이산화황 가스의 산화 및 암모니아와의 결합에 의해 생성된다(Hwang, 2010). 또한 햇빛과 고온에서 광화학반응을 일으켜 입자로 전환이 발생하여 여름철의 기여도가 높은 것으로 보고되어 있다(Kim and Hopke, 2004).

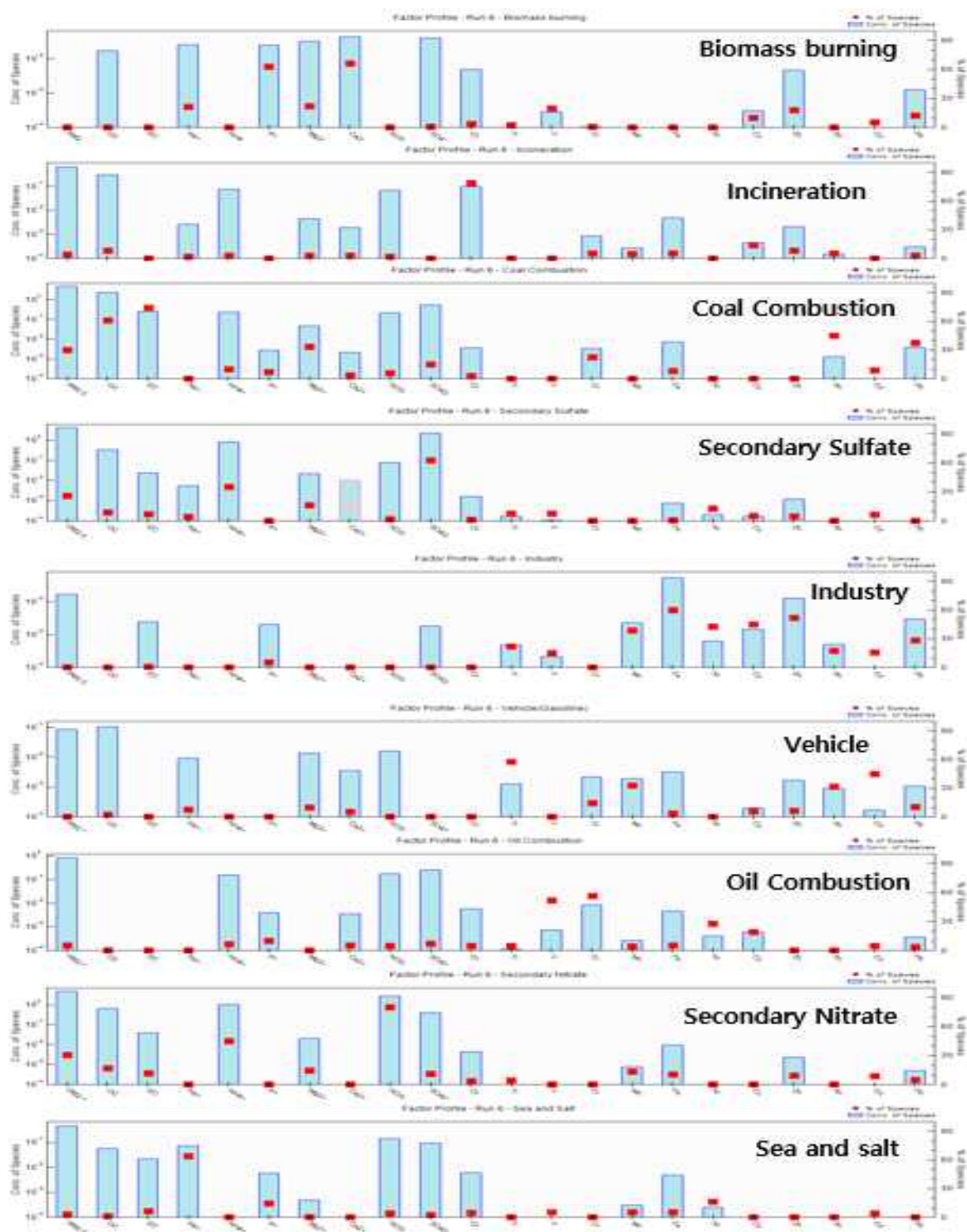


Fig 7. Source profiles for PMF at Jangbong.

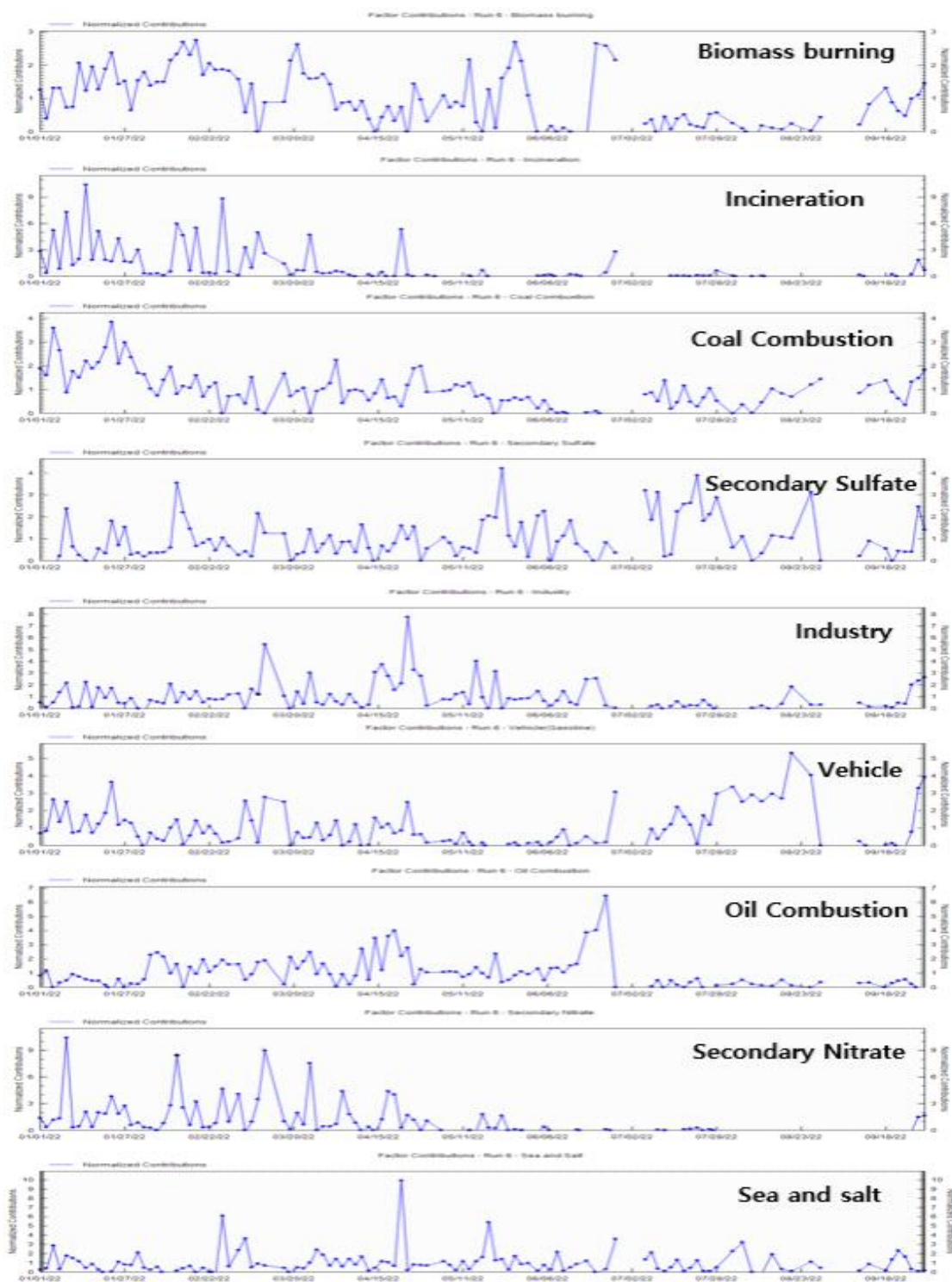


Fig 8. Daily PMF source contribution plots for Jangbong.

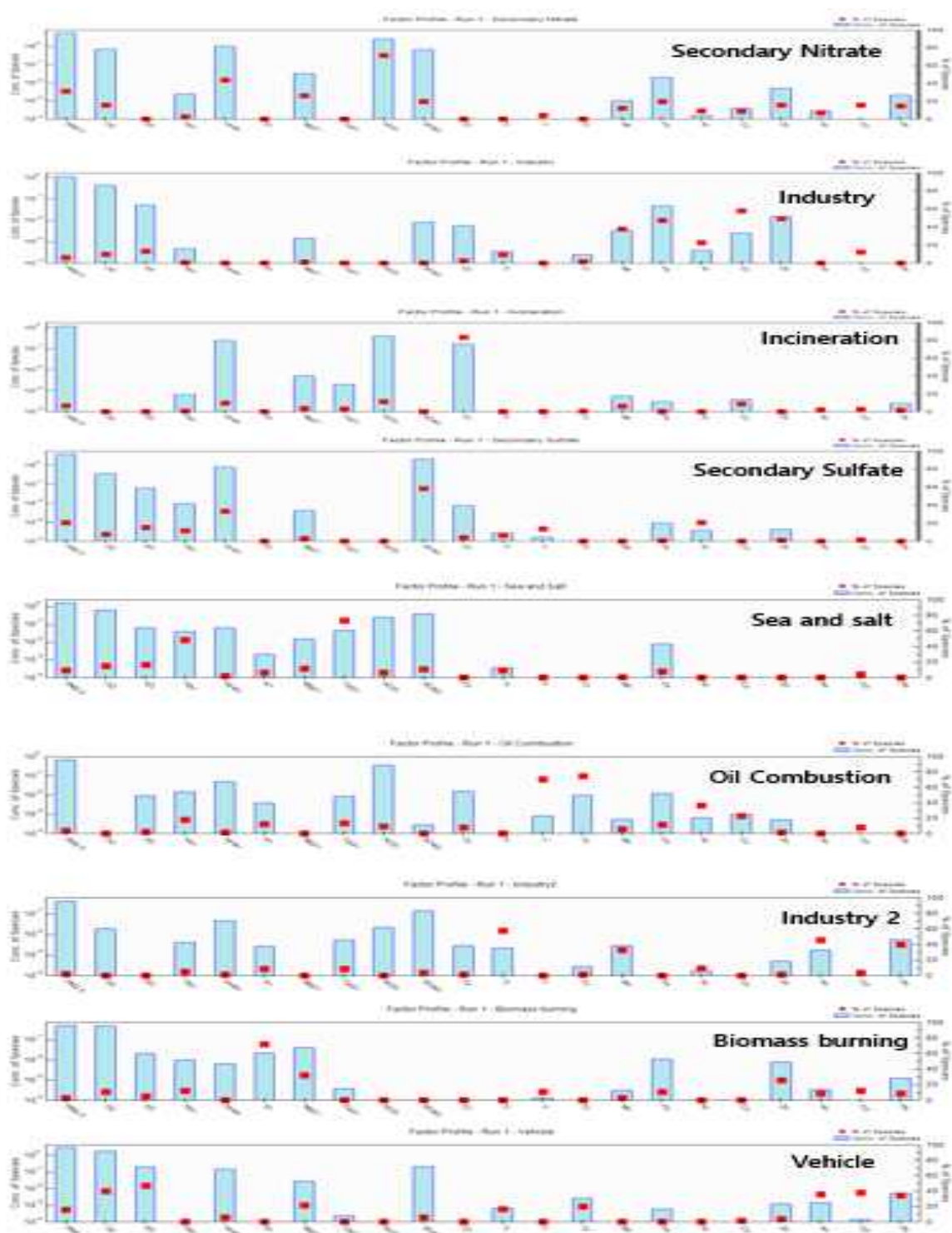


Fig 9. Source profiles for PMF at Youngjong.

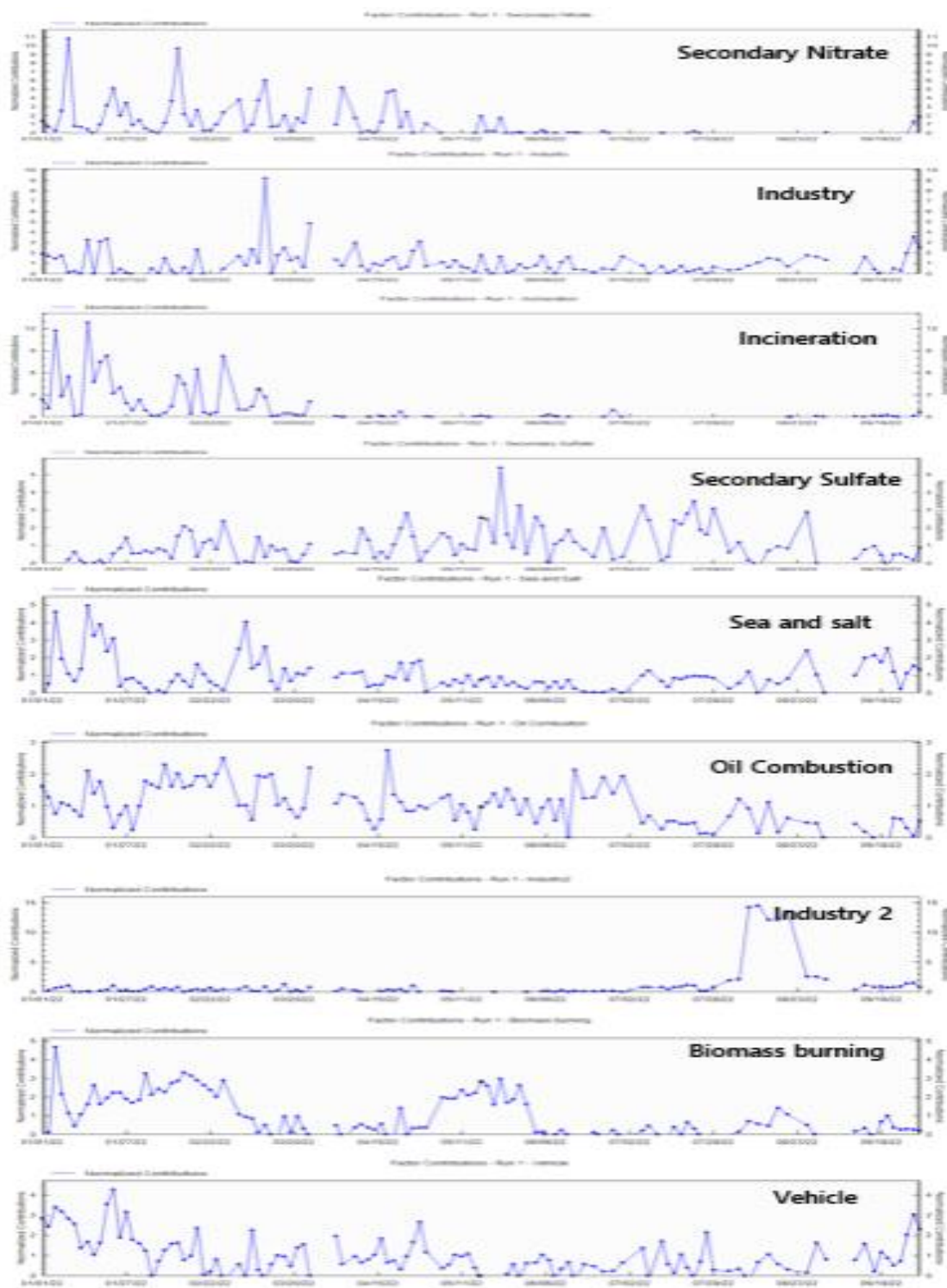


Fig 10. Daily PMF source contribution plots for Youngjong.

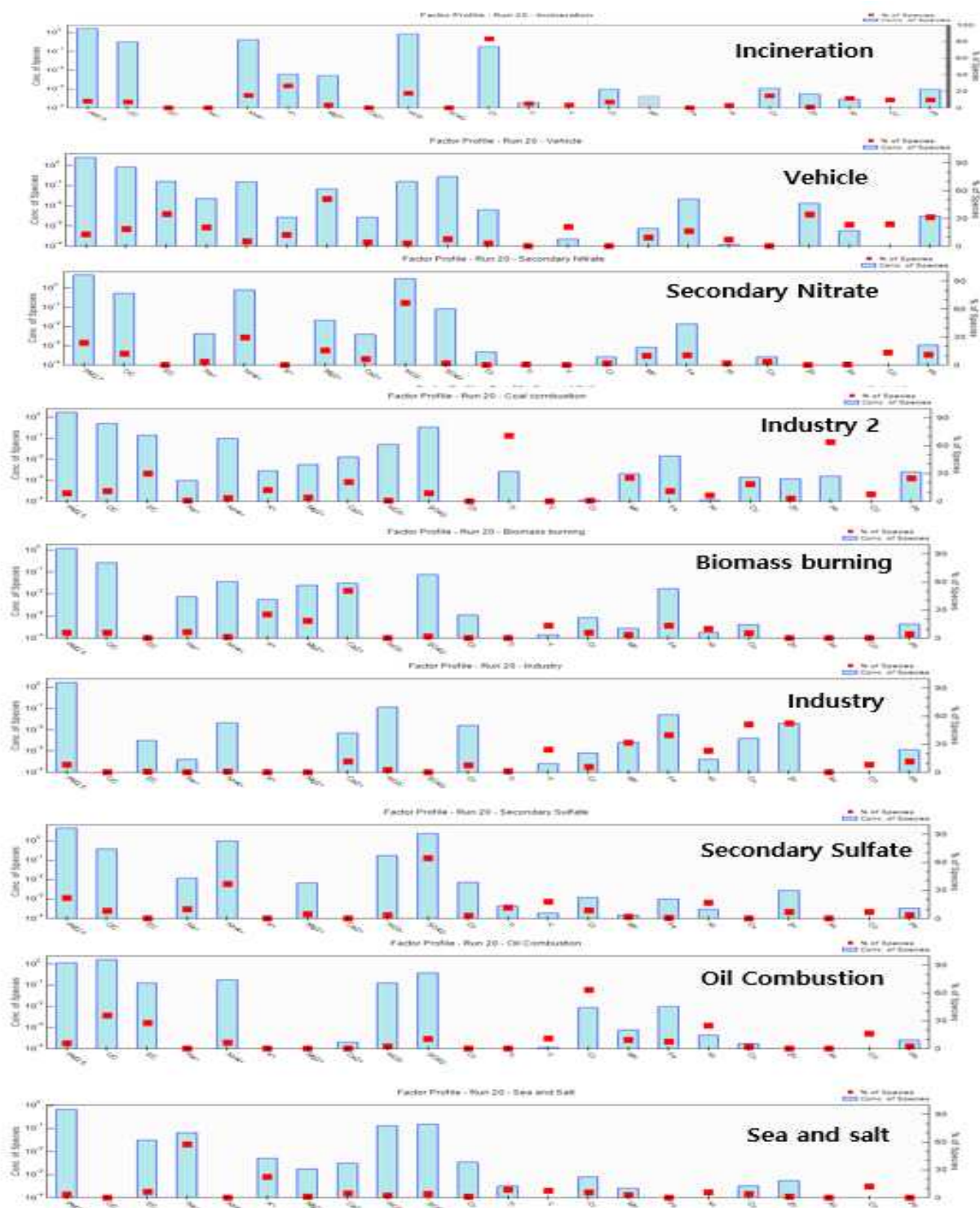


Fig 11. Source profiles for PMF at Guwol.

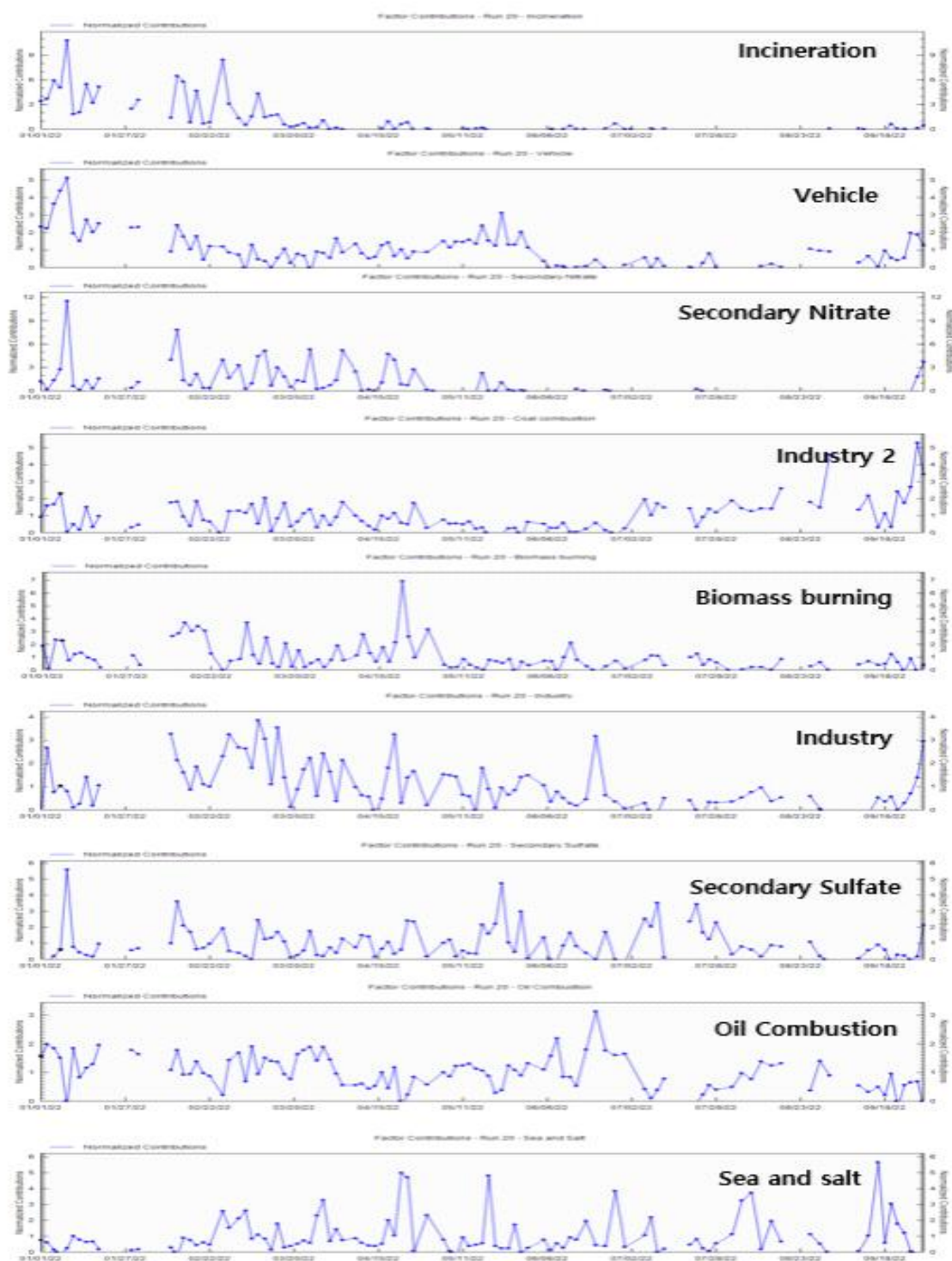


Fig 12. Daily PMF source contribution plots for Guwol.

세 번째 오염원은 Mn, Fe, Cu, Zn 등이 주로 기여하는 산업활동에 의한 오염원으로 분류하였다. PM-2.5 기여도는 장봉지역 0.1%, 영종지역 6.3%, 구월지역 8.5%로 조사되었다.

네 번째 오염원은 OC, EC, Fe, Zn 등의 영향을 받는 이동성 오염원(Vehicle)으로 분류하였다. 장봉지역 0.5%, 영종지역 16.4%, 구월지역 13.1%로 나타났으며, 장봉지역의 경우 이동성 오염원 분류 시 다른 지역과 다르게 Diesel 영향보다는 Gasoline 차량으로 제한적으로 영향받는 것으로 조사되어 좀더 확인이 필요한 부분이다.

다섯 번째 오염원은 Ni, V 등이 주로 기여하는 중유연료 연소(Oil combustion)이다. 니켈(Ni)과 바나듐(V)은 중유(Heavy oil) 연소 시 중요한 부산물로, 인천지역은 대형 항만과 선박 등에서 많은 양의 중유를 사용하고 있다. 항만이 인접한 지역 뿐만 아니라 주거지역에서도 오일연소 비율이 낮지 않은 수준이었으나, 상대적으로 오염원 수가 다양하지 않은 장봉지역의 경우 다른 오염원에 비해 오일 연소에 대한 상대적 비율은 높은 편으로 조사되었다.

여섯 번째 오염원은 NO_3^- , NH_4^+ 등이 주로 기여하는 2차 질산염(Secondary nitrate)으로, 세 지역에서 모두 가장 높은 비율을 나타냈다. 대기 중 NO_2 는 OH 라디칼 등에 의해 산화되어 질산을 생성하고 암모니아와 결합하여 질산암모늄 입자를 형성하며 미세먼지 농도를 높이게 된다. 일반적으로 NO_3^- 는 높은 상대습도 및 낮은 온도에서 질산암모늄(NH_4NO_3)이 쉽게 형성되어 겨울철에 높은 특성을 보이며, 국내 질소산화물 배출량과 장거리 국외배출량인 중국 지역 질소산화물이 산화하여 2차 질산염이 형성된다. 이번 연구대상 지역의 시료채취기간 동안 대체로 겨울철에 질산이온이 고농도를 보이고, 일별 PMF 오염원 기여도에서도 겨울철에서 여름철로 갈수록 낮아지는 특성을 나타내 이러한 특성들을 잘 설명해 주었다.

일곱 번째 오염원은 Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} 등이 기여하는 해염 입자로(Sea and salt) 분류하였다. 해염입자 기여도는 영종지역에서 이차생성물질 기여도와 이동배출원 기여도 다음으로 높은 비율을 나타낸 것으로 조사되었으며, 계절에 따른 기여도 특성은 크게 보이지 않으나 해풍의 방향에 따라 영향을 받는 것으로 추정된다.

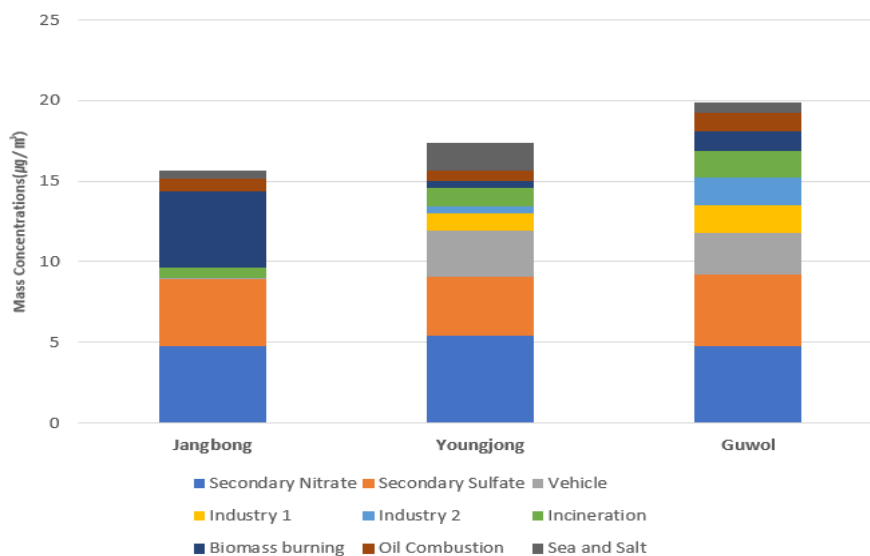


Fig 13. Comparison of mass contribution of source for each sampling site.

3.3. 인천시 초미세먼지 도심지역 기여도 평가

본 연구에서는 유입에 따른 인천시 도심지역에 대한 영향을 평가하기 위해 인천지역 PM-2.5 농도 및 도심지역의 농도와 배경지역의 농도를 활용하여 도심지역 기여도를 평가해 보았다. 또한 인천광역시 진단평가시스템의 지역별 기여도 분석 결과와 수동실측값을 비교해 보았다. 모델 결과값의 경우 매월 일자료 실측값에 맞춰 보정하여 일치도를 향상시켰으며(Fig 14. [a]), 각각의 결과값은 대체로 비슷한 경향을 보였으나 실측 값 기여도가 모델 기여도보다 약간 더 높은 수준을 나타냈다(Fig. 14. [b]).

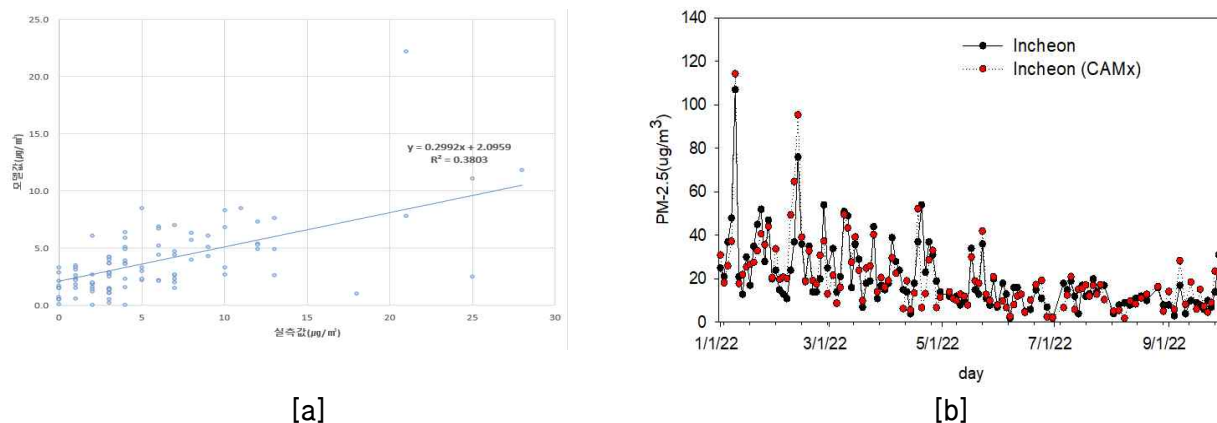


Fig 14. Comparison of predicted PM-2.5 mass concentrations from CAMx modeling with measured PM-2.5 mass concentrations.

인천 도심 기여도 평가를 위해 실측 값의 도심기여도는 구월(도심) PM-2.5 농도에서 장봉(배경) PM-2.5 농도의 차이 값을, 모델 값의 도심기여도는 CAMx 모델의 인천 내륙 값을 사용하였다. 시료채취 기간 동안 PM-2.5 누적 평균 값은 인천지역이 $21.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 인천 도심(구월-장봉) $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 인천 도심(CAMx) $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었으며, PM-2.5 누적 기여율은 인천 도심실측 값은 21.8 %, 인천 도심 모델값은 16.5 %로 조사되었다(Fig. 15, Table 4).

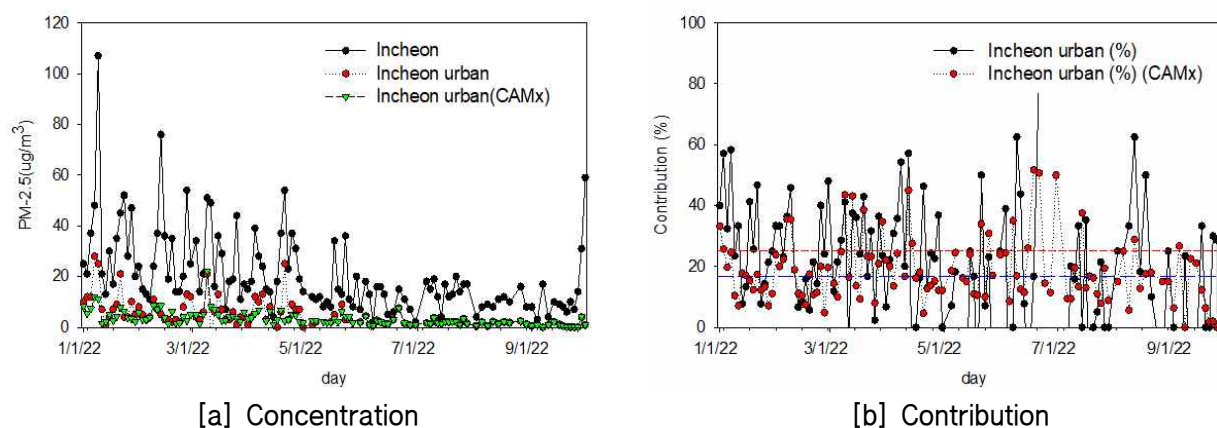


Fig 15. PM-2.5 concentration and contribution of Incheon urban according to sampling period.

Table 4. The PM-2.5 concentrations and contribuiton of Incheon and Incheon urban(actual survey, CAMx model)

Statistics	PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			Contribution (%)	
	Incheon	Incheon urban	Incheon urban(CAMx)	Incheon urban	Incheon urban(CAMx)
Cumulative mean	21.1	4.6	3.4	21.8	16.5

3.4. 백령도 국가배경지역 성분조사 결과

본 연구에서는 시료채취 기간 중 5월(5월 17일~6월 9일)과 10월(9월 30일~10월 18일)에 백령도 국가배경 대기측정소에서 다른 지점과 동일한 조건으로 시료를 동시 채취하여 분석을 진행하였다. Fig. 16.은 5월과 10월 기간동안 각 지점별 초미세먼지 및 주요성분들의 평균 농도를 비교하였으며, 대체로 배경지역에서 도심지역으로 갈수록 PM-2.5와 성분의 농도가 높아지는 것으로 조사되었다. 배경지역 중 백령도와 장봉도 두 지역 간의 농도 수준은 성분 항목별로 달라지는 것을 볼 수 있었으나, 구월 도심지역은 두 배경지역에 비해 대부분의 주요 항목에서 더 높아지는 경향으로 조사되었다. 또한 초미세먼지 농도가 낮아지는 기간인 5월 중순~6월 초 기간에 비해 농도가 높아지기 시작하는 9월 말~10월 중순에 성분들의 농도 차이가 더욱 뚜렷하게 나타나는 경향을 나타냈다(Fig. 16. [a], [b]).

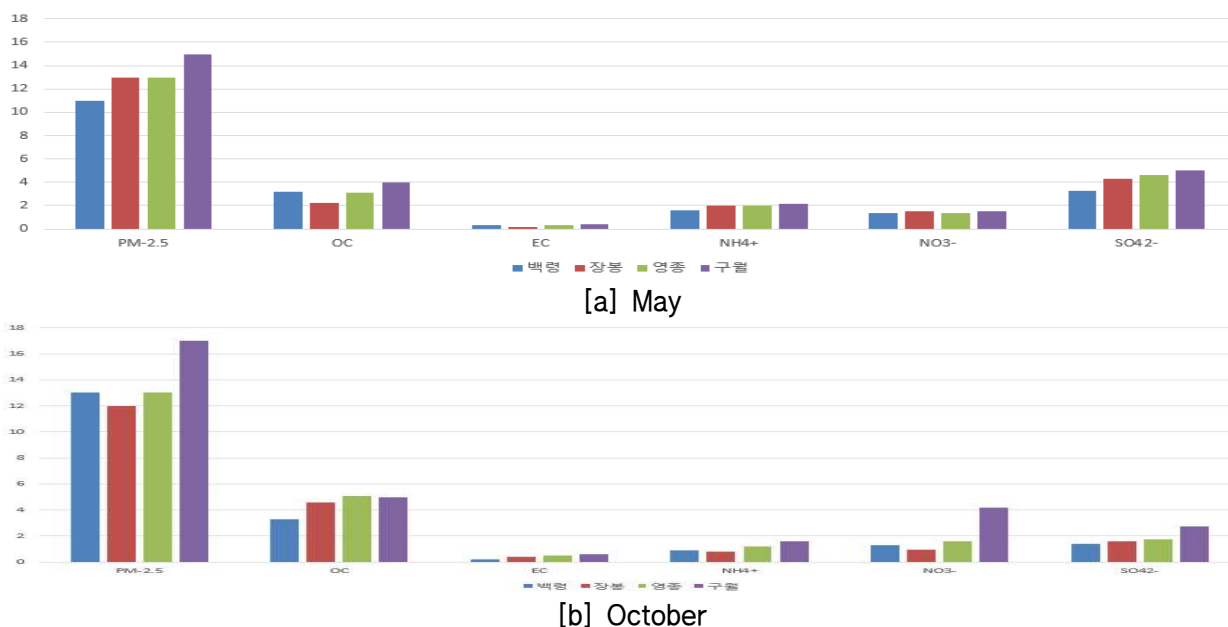


Fig. 16. Concentration of PM-2.5 and main chemical component for each sampling site.

백령도와 연구대상 지점에서의 성분의 질량 농도와 분율은 전체적으로 유입 전단(백령, 장봉), 유입경로(영종), 도심(구월) 순으로 높아지며, 2차 생성 물질(유기탄소, 암모늄이온, 질산염, 황산염)을 중심으로 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 반면 이온성분물질 중 나트륨 이온(Na^+), 칼륨 이온(K^+), 염소 이온(Cl^-)의 경우 배경지역(백령, 장봉)에서 질량농도 및 분율이 더 높은 경향을 보였는데(Table 4, Table 5), 지점의 위치 특성 상 해염입자의 영향을 더욱 받은 것으로 추정되며 이는 유입에 따라 노화해염입자(Aged sea salt) 오염원이 될 수 있다. 도심지역에서 Na^+ , Mg^{2+} 의 농도가 높고 상대적으로 Cl^- 는 낮은 농도 경향을 나타내는 것은 노화된 해염입자로 분리될 수 있는데, 해염입자가 유입에 따라 내륙으로 이동 시 산화과정에 따라 Cl^- 와 H^+ 가 결합하여 HCl 로 되어 고갈되기 때문에 상대적으로 Na^+ 는 높은 기여율을, Cl^- 은 낮은 기여율을 나타내는 편이다(EPA, 2017).

Table 5. The concentrations and mass fraction of PM-2.5 and chemical components at each sample site from May 17 to June 9 2022

Species	Baekreong		Jangbong		Youngjong		Guwol	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
PM-2.5	11	-	13	-	13	-	15	-
OC	3.2	29.1	2.2	16.9	3.1	23.8	4.4	29.3
EC	0.3	2.7	0.2	1.5	0.3	2.3	0.4	2.7
Na^+	0.1044	0.9	0.1416	1.1	0.1099	0.8	0.1074	0.7
NH_4^+	1.5597	14.2	1.9753	15.2	1.9794	15.2	2.1813	14.5
K^+	0.0069	0.1	0.0611	0.5	0.0392	0.3	0.0096	0.1
Ca^{2+}	0.1595	1.5	0.1071	0.8	0.0991	0.8	0.1130	0.8
Mg^{2+}	0.0375	0.3	0.0566	0.4	0.0354	0.3	0.0301	0.2
NO_3^-	1.3656	12.4	1.5240	11.7	1.3492	10.4	1.5438	10.3
SO_4^{2-}	3.2569	29.6	4.3253	33.3	4.6169	35.5	4.9981	33.3
Cl^-	0.0756	0.7	0.0225	0.2	0.0309	0.2	0.0219	0.1
Metal	0.0960	0.9	0.1647	1.3	0.1686	1.3	0.2473	1.6
Unknown	0.8379	7.6	2.2218	17.1	1.1714	9.0	0.9475	6.3

Table 6. The concentrations and mass fraction of PM-2.5 and chemical components at each sample site from September 30 to October 18 2022

Species	Baekreong		Jangbong		Youngjong		Guwol	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
PM-2.5	13	-	15	-	16	-	17	-
OC	3.5	26.9	4.6	30.7	5.1	31.9	4.9	28.8
EC	0.3	2.3	0.4	2.7	0.5	3.1	0.6	3.5
Na^+	0.0803	0.6	0.0669	0.4	0.0521	0.3	0.0532	0.3
NH_4^+	0.8207	6.3	0.8106	5.4	1.1863	7.4	1.3632	8.0
K^+	0.0142	0.1	0.0175	0.1	0.0053	0.0	0.0052	0.0
Ca^{2+}	0.0577	0.4	0.1633	1.1	0.1489	0.9	0.1540	0.9
Mg^{2+}	0.0370	0.3	0.0517	0.3	0.0374	0.2	0.0479	0.3
NO_3^-	1.3467	10.4	0.9737	6.5	1.5773	9.9	1.8862	11.1
SO_4^{2-}	1.2218	9.4	1.6245	10.8	1.7732	11.1	1.8328	10.8
Cl^-	0.0927	0.7	0.0588	0.4	0.0459	0.3	0.0312	0.2
Metal	0.1211	0.9	0.1509	1.0	0.2658	1.7	0.2733	1.6
Unknown	5.4078	41.6	6.0821	40.5	5.3078	33.2	5.8530	34.4

IV. 결론

본 연구에서는 2022년 1월부터 10월까지 인천 옹진군 장봉도, 중구 영종도, 남동구 구월동 대기 측정소에서 채취·분석한 초미세먼지 및 성분 조사 자료를 통해 미세먼지 유입 영향에 따른 구성성분 물질의 농도 분포와 지역규모의 오염원 및 기여도를 추정하였고 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 연구 대상지점의 초미세먼지 평균 농도는 장봉지역 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 영종지역 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 구월지역 $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 유입전단, 유입경로, 도심지역 순으로 PM-2.5 및 구성성분 물질들이 높아지는 경향을 보였다. 초미세먼지 화학성분 조성은 세 지역 모두 이온성분, 탄소성분, 기타성분, 금속성분 순으로 높았으며, 이온성분 중 장봉지역은 황산이온이, 영종과 구월 지역은 질산이온이 가장 높았다. 초미세먼지 성분 중 개별 성분은 유기탄소 성분이 가장 높았으며, 탄소성분은 미세먼지 저농도 기간인 여름철로 갈수록 PM-2.5 내 상대적 비율이 높아지는 것으로 조사되었다.
2. PMF 모델 결과, 세 지역 모두 2차 질산염, 2차 황산염의 비율이 가장 높았으나 지역별 특성에 따라 오염원 기여도가 달라졌다. 장봉지역은 석탄, 바이오매스 연소 및 소각, 오일 연소의 비율이 상대적으로 높았으며, 영종지역은 이동오염원, 노화해염입자의 영향이 컸다. 구월지역은 차량과 산업활동 관련 오염원의 기여도가 큰 것으로 조사되었다. 또한 인천시 도심지역에 대한 기여도를 진단평가시스템 모델값과의 비교를 통해 평가해 보았으며, 도심지역 이동에 따른 초미세먼지 누적 기여도는 실측기반 21.8%, 모델기반 16.5%로, 배경지역에서 도심지역으로 갈수록 초미세먼지의 약 20%가 내륙에서의 이동에 영향을 받아 증가하는 것으로 분석되었다.
3. 인천시 연구대상 세 지역 모두 2차 생성 미세먼지에 대한 기여율이 가장 높고, 미세먼지 농도가 증가할수록 대기 중의 가스상 전구체들이 입자상으로 변환하여 더욱 급격하게 증가한다. 따라서 고농도 초미세먼지 발생을 방지하기 위해서는 2차 생성물질 중 가장 높은 비율을 차지하는 2차 질산염 및 황산염의 오염원을 집중적으로 관리하는 것이 필요하다. 본 연구결과는 인천시의 초미세먼지 유입에 따른 주요지역의 오염원 발생원인을 분석함으로써, 향후 배출원에 대한 관리 및 지역맞춤 효율적인 저감대책 수립에 기초자료로 활용될 수 있다.

※ 본 연구는 국립환경과학원의 ‘환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반 구축 사업’에 따른 국고보조금이 일부 지원되어 이루어졌습니다.

V. 참고문헌

- [1] 경기도보건환경연구원 (2020). PMF 수용모델 적용 및 포천/평택 미세먼지 기여율 산정.
- [2] 구태완, 홍민선, 문수호, 김호정(2019) PMF 모델을 이용한 도심지역 PM-2.5 오염원 기여도 분석, 한국대기환경학회, 36(3), 905-914.
- [3] 박혜영 (2022) 수용모델을 이용한 광양만권 주거지역 대기 중 초미세먼지 발생원 기여도 평가(Ⅱ), 환경분석과 독성보건, 25(1), 18-32.
- [4] 서울시보건환경연구원 (2019). 2019년 초미세먼지 성분 분석 보고서.
- [5] 인천보건환경연구원 (2022). 2022년 보건환경연구원보.
- [6] 환경부 (2017). 미세먼지 국내외 기여율 산정 및 수용모델 적용 가이드라인 마련.
- [7] 황인조 (2022) EPA-PMF 모델을 이용한 포항 PM_{2.5} 측정망 자료에 대한 오염원 기여도 추정, 한국대기환경학회, 38(3), 354-374.
- [8] USEPA (2014). PMF 5.0 Fundamentals and User Guide.
- [9] Jieun Park et al. (2022), Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF. Science of the Total Environment 833.